

DIE LAGE DER ZAHNWURZELN IM OBER- UND UNTERKIEFER UND IHRE DRUCKAUFNahme



INAUGURAL-DISSERTATION

**ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE DER
ZAHNHEILKUNDE DER HOHEN MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
DER UNIVERSITÄT BASEL**

vorgelegt von

ROBIN MÜLLER

VON THAYNGEN (SCHAFFHAUSEN)

1951

Buchdruckerei R. M. Strüby's Erben Murten

An dieser Stelle möchte ich nicht unterlassen, Herrn Prof. Dr. G. Vest für die Ueberlassung des Themas zu danken.

Ebenfalls herzlichen Dank meinem verehrten Onkel, Herrn Adolf Weber, dipl. Ing., für seine wertvollen Ratschläge.

Von der medizinischen Fakultät Basel genehmigt
auf Antrag von Prof. Dr. G. Vest.
Promotion: 14. Juni 1950.

**DIE LAGE DER
ZAHNWURZELN
IM OBER- UND UNTERKIEFER
UND IHRE DRUCKAUFNahme**



INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE DER
ZAHNHEILKUNDE DER HOHEN MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
DER UNIVERSITÄT BASEL

vorgelegt von

ROBIN MÜLLER
VON THAYNGEN (SCHAFFHAUSEN)

1951

Buchdruckerei R. M. Strüby's Erben Murten



Einleitung.

Was unter der *Zweckmässigkeit der organischen Dinge* gemeint ist, leuchtet wohl jedermann klar ein, sodass es sich erübrigt, darüber viele Worte zu verlieren. Schon beim niedersten einzelligen Lebewesen und natürlich noch in vermehrtem Masse bei den höheren, finden sich anatomische u. physiologische Gegebenheiten, welche dazu geschaffen sind, irgendwelche Ziele zu erreichen, und die z. B. in tieferem Sinne vorhanden sind, um die Erhaltung der einzelnen Lebewesen oder einer bestimmten Gattung zu garantieren. Natürlich gibt es in der Welt der Lebewesen Dinge, die dem Verstand des Menschen vorerst als unsinnig erscheinen möchten — man denke an das Geweih eines kapitalen Zwölfenders — aber wer weiss, vielleicht wären auch hier verborgene Zweckmässigkeiten zu finden. Kurz, es überwiegt im allgemeinen doch das Zweckverbundene, Zielbedingte, sodass wir nicht anders können, als die Einrichtungen und Tätigkeiten der belebten Natur unter diesem Gesichtspunkte zu betrachten.

Als Beispiel möge eine histologische Gegebenheit dienen, welche nicht nur die anatomische, sondern auch die physikalische Untermauerung erfahren hat, nämlich der Bau der Knochen. In der schwammigen Knochensubstanz, die wir an den Enden der langen Röhrenknochen, wie Femur, finden können, verlaufen die Bälkchen so, wie sie nach den statischen Berechnungen eines Ingenieurs für ein solches Gerüst gesetzt würden — und das im Bestreben, mit möglichst geringem Materialverbrauch eine möglichst grosse Festigkeit zu erzielen. Es liesse sich ferner zeigen, dass diese Struktur des Knochens dadurch zustande kommt, dass die Knochenzellen die Kalksalze in der Richtung des Druckes und Zuges ausscheiden, oder genauer gesagt: sie scheiden in der Richtung der Spannungslinien Fibrillen von Interzellulärsubstanz aus, die dann anschliessend verkalkt wird.

Ganz abgesehen davon, dass wir im Folgenden diese vorerwähnten Tatsachen nicht nur im Röhrenknochen, sondern auch im menschlichen Ober- und Unterkiefer vorfinden werden, habe ich mir die Aufgabe gesetzt, den „Zweckmässigkeiten“ dieses menschlichen Organs nachzugehen, und unter diesem Gesichtswinkel das in der zahnärztlichen Literatur Verstreute zusammenzufassen und zugleich genauer Untersuchtes und Neues beizufügen.

Eine „Zweckmässigkeit“ des menschlichen Gebisses, die uns im Besonderen beschäftigen wird, ist vor allem die Lage der Wurzeln im Kiefer, aber auch die Form der Wurzeln, weil sich in ihr die Funktion des Zahnes als Mittel der Kaudruck-Uebertragung manifestiert.

Die Lage und Form der Zahnwurzeln kann wiederum erst aus dem physiologischen Ablauf des Kauvorganges verstanden werden, sodass wir uns vorerst mit diesem befassen müssen.

Die Mechanik des Kauens.

Das Wissen und das Arbeitsgebiet des Zahnarztes befasst sich nun vornehmlich mit der Behandlung aller Organe oder Organteile, die zur Aufnahme und Zerkleinerung der Nahrung, wie auch zur Lautbildung dienen. Indem nun einerseits die feine Aufarbeitung der Nahrungsmittel dem Magen-Darmtraktus und den in diesem vorhandenen Fermenten zufällt, so ist es andererseits die Aufgabe der Zähne, der Zunge und der Kiefermuskulatur, durch eine mechanische Zerkleinerung der Nahrungsteile die bestmöglichen Voraussetzungen für das Einwirken eben jener Fermente zu schaffen. Allerdings treten auch schon im Munde chemische Einwirkungen durch die Fermente des Speichels auf, aber dennoch ist die Wirkung der Mundorgane in der Hauptsache eine physikalische.

Die Arbeit der Kauorgane ist eine *mechanische* Arbeit, und so werden in der Behandlung dieser Fragen alle jene Begriffe auftauchen, die sich auch in der Physik mit dem allgemeinen Begriff „Mechanik“ verbinden, so vor allem:

die Bewegung im Raum,
die Kräfte als Ursache von Beschleunigungen,
die Zusammensetzung von Kräften, Richtkräfte,
die Drehachsen, Hebel und Maschinen,
der Impuls.

Ferner werden wir uns auch mit Elastizität von festen und flüssigen Körpern, nicht zuletzt auch mit dem hydrostatischen Druck und der inneren Reibung befassen müssen.

Obwohl ich in der vorliegenden Arbeit nicht näher auf alle vorerwähnten mechanischen Gesetze eingehen möchte, so spielen diese Fragen doch in den einzelnen Disziplinen der Zahnheilkunde eine nicht unwichtige Rolle, sodass man ohne sie nicht in der Lage ist, die in den anatomischen Gegebenheiten verborgene Zweckmässigkeit genügend zu erfassen.

Ich will daher versuchen, in der vorliegenden Schrift näher auf diese Fragen einzugehen, und möglichst nicht in jene Fehler zu verfallen, die auch bei neueren Forschern in ihren Veröffentlichungen nicht selten auftreten. Ich denke daran, dass sehr oft die Begriffe Kraft, Arbeit, Druck nicht genau unterschieden werden und in der Folge unrichtige Schlüsse für Behandlungsmethoden, z. B. in der Orthodontie, gezogen werden.

Die Beschreibung der Statik und Dynamik des Kauorganes sollte nun eigentlich mit der Beschreibung des Kiefergelenkes beginnen, spielt dieses doch eine überragende Rolle auf allen Gebieten der prothetischen wie auch der chirurgisch operativen Zahnheilkunde. Diese Fragen wurden nun allerdings durch viele Forscher schon eingehend beschrieben, man denke da an Alfred Gysi, Bennett, Monroe, M. Müller, Bonwill, um nur die Bedeutendsten zu nennen.

Aus diesem Grunde möchte ich die Behandlung des Kiefergelenkes und seines Bänderapparates übergehen, und mich mit den Zähnen, ihrer Form und Achsenrichtung, wie auch mit ihrer bindegewebigen und knöchernen Abstützung nebst den dazu gehörigen Weichteilen befassen. Allerdings nicht, ohne vorher die Bewegungsvorgänge der ganzen funktionellen Einheit, welche den Kauakt besorgt, wenigstens kurz beschrieben zu haben. Alle diese Bewegungsvorgänge bestehen nun, wenn wir von den Bewegungen

von Schlund, Lippen und Muskeln absehen wollen, aus einer räumlichen Lageveränderung des Unterkiefers.

Die Bewegungserscheinungen, die bei der Funktion dieses Organes entstehen, sind nicht nur vom Standpunkt des Physikers aus interessant, sondern auch stammesgeschichtlich nimmt der Kiefer und das Gebiss des Menschen eine ganz besondere Stellung ein. Die Zahnformen des Menschen, sein Kiefergelenk und die dazu gehörige Muskeltätigkeit stehen mit der Ernährungsweise in einem gewissen Zusammenhang. Oder anders ausgedrückt: *die Formung dieses mechanischen Systems folgt seiner Funktion*. Daher ist auch in der Behandlungsmethode des Zahnarztes die Kenntnis dieser Vorgänge von grossem Einfluss, um eine wirkungsvolle Therapie anwenden zu können. Wir werden uns nicht nur in der Prothetik, sondern auch in der Behandlung des erkrankten Paradentiums und in der konservierenden Zahnheilkunde mit diesen mechanischen Fragen zu befassen haben.

Jede Aenderung der Funktion, sei es durch eine abnormale Ernährungsweise, durch Ueberbeanspruchung oder durch irgendwelche Veränderung pathologischer Natur, muss in diesem beweglichen System, in der Abstützung und Verankerung seiner Teile zum Ausdruck kommen.

Ausgehend von der physiologischen Ruhelage, jener Lage also, welche die Mandibula bei ungezwungener Kopfhaltung einnimmt, können die Kieferbewegungen beim Menschen nun folgendermassen unterteilt werden:

- a) *Senken* in die unterste Grenzlage. In dieser Lage kann eine seitliche Verschiebung des Unterkiefers nicht mehr stattfinden.
- b) *Heben*, also eine Umkehrung der vorgenannten Bewegung, und zwar so weit, bis die Zahnreihen ihren maximalen Flächenkontakt gefunden haben. Diese Bewegung findet also ihr Ende in der zentralen Okklusion, sofern überhaupt noch miteinander artikulierende Zähne vorhanden sind. Diese Lage kann nach R. Loos auch als „mechanische Ruhelage“ bezeichnet werden, zum Unterschied von der „physiologischen Ruhelage“ (die durch den Tonus der Schliess- und Oeffnungsmuskulatur bedingte Schwebelage des Unterkiefers, bei welcher sich die Zähne nicht berühren).

- c) *Vorschieben*. Auch diese Bewegung findet ihr Ende in einer vorderen Grenzlage.
- d) Die Umkehrung dieser Bewegung ist das *Zurückschieben* in die mechanische Ruhelage. Bei Individuen ohne artikulierende Zahnreihen kann diese Bewegung noch weiter nach hinten forciert werden.
- e) Auch die *seitlichen Bewegungen* finden ihr Ende in einer seitlichen Grenzlage, wobei sich der Kiefer in einer annähernd horizontalen Ebene bewegt

Das räumliche Gebilde, innerhalb dessen bei all diesen Bewegungsformen des Kauvorganges irgend ein Punkt des Unterkiefers seine Exkursionen ausführt, ist nun ein Rhomboëder.

Die Bewegung des Unterkiefers ist nun nicht nur durch die Form der Gelenke und durch die Höckerformen der Zähne bedingt, sondern im Wesentlichen auch durch die Art und Weise, wie der Muskelzug an der Mandibula angreift und wie die dadurch entstehenden Kräfte wirken. Aus der Gegenüberstellung von Muskelinsertion und Muskelursprung können wir die Richtung der auf dem Unterkiefer und indirekt auch auf Zähne und Kiefergelenk und auf den Alveolarfortsatz des Oberkiefers wirkenden Kräfte erkennen. Aus der Bewertung der einzelnen Kräfte, den Konstruktionen der Resultierenden oder aus ihrer Zerlegung in verschiedene Komponenten ergeben sich dann wiederum wichtige Folgerungen für Mechanik und Form des Gebisses und seine Abstützvorrichtungen.

Um diese Frage näher behandeln zu können, wird es wohl zuerst das beste sein, wenn wir kurz die einschlägigen Muskelverhältnisse wiederholen, um im Anschluss daran die entstehenden Zug- und Druckkräfte aufzuzeigen.

Zunächst wird man feststellen, dass die *musculi masseter* sowie auch *pterygoideus medialis* die Gegend des Mandibulawinkels wie eine Schlinge umfassen. Der mesiale Rand dieser Schlinge kann relativ weit nach vorne reichen, ist jedoch bei den einzelnen Individuen sehr variabel. Bei gleichzeitiger Innervation der beiden Muskeln haben wir eine Schliessbewegung. Bei wechselseitiger Innervation hingegen werden auch kippende Momente

wirksam, welche sich als transversale Kraftkomponenten äussern. Dies tritt vor allem beim Kauakt in Erscheinung.

Der *musculus temporalis* hat seine Insertion am proc. coronoideus der Mandibula und bewirkt vor allem die Hebung des Unterkiefers. Man schreibt ihm auch etwa rückziehende Wirkung zu. Die Richtung der Zugkraft ist ziemlich genau durch die Richtung des proc. coronoideus gegeben, welcher seinerseits ja als Ausdruck der Muskelaktion anzusehen ist.

Indem nun die Resultante der drei genannten Kaumuskeln vor allem nach oben wirkt, so ist dem vierten Muskel der Kaumuskelgruppe, dem *musculus pterygoideus lateralis* eine ganz andere Funktion eigen. Sein Ursprung ist doppelt, und zwar an der lamina externa des proc. pterygoideus und an der unteren Fläche des grossen Keilbeinflügels. Die Insertion an der Mandibula ist folgende: Zum Teil inseriert er am Köpfchen gerade unterhalb der Gelenkfläche, andererseits aber an der Gelenkkapsel und am discus articularis. Seine Aufgabe besteht in der Vorziehung des Unterkieferköpfchens.

Wenn wir uns den Unterkiefer „schematisch“ als „einar-migen Hebel“ vorstellen, ein Hebel, dessen Drehachse wir im Mittelpunkt des condylus articularis annehmen wollen, so werden alle diese vier Muskeln auf der einen Seite dieses Drehpunktes angreifen, und wird die resultierende Kraft kranialwärts gerichtet sein.

Nach den Definitionen der Physik ist ein Hebel ein Körper, der um eine Achse drehbar ist, deren Lage durch äussere Bedingungen gegeben ist. Es ist nicht nötig, dass die Lage der Achse im Hebel immer die gleiche ist. Sie kann sich auch bei einer Drehung des Hebels verändern. Man kann daher Hebel mit ortsfester, solche mit im Körper fester Achse und solche mit veränderlicher Achse unterscheiden. Das letztere liegt nun im Unterkiefer vor, dessen Schliessungsdrehachse schon von Chaim Chissin als ausserordentlich veränderlich erkannt wurde. Diese Veränderlichkeit ist später auch von Bennett und Gysi genauer untersucht und bestätigt worden.

Die Lagen dieser Drehachse finden wir in Blatt 1, wobei

die Kurve A die Bewegungslinie des dentale inferius, B die Bewegungslinie der den discus articularis berührenden Fläche des Kieferköpfchens bedeuten. Ein Vergleich zwischen Abb. 1 und 1a ergibt ebenfalls einen Unterschied der Bahnkurve der Drehachsen beim Scherenbiss- und beim Zangenbisskauen (Blatt 1).

Es wäre allerdings zu den bei diesen Aufzeichnungen üblichen Registriermethoden zu bemerken, daß diesen rein methodische Fehler anhaften. Die Auffindung der Kiefergelenke mit den Schreibspitzen ist eine ziemlich vage Angelegenheit, abgesehen von den Fehlern, die etwa in den kleinen Schwankungen der Biss-Schablonen oder in der Apparatur selbst gelegen sind. Es ergibt sich, jedoch ohne Berücksichtigung von Abweichungen, dass die Oeffnungsdrehachse ihre Lage ganz wesentlich verändert. Die Darstellung dieser Drehachse zeigt uns, dass beim Schliessen der Kiefer auf jener Strecke, in welcher sich der grösste Kaudruck äussern wird, der Gelenkkopf so gut wie nichts vorwärts oder rückwärts geht. Es findet vornehmlich nur eine Drehung des Köpfchens statt. Erst bei weiterer Oeffnung macht der Gelenkkopf eine ausgedehnte Vorwärtsbewegung. Für unsere statischen Betrachtungen wird also nur diese vorgenannte *anfängliche Bewegungsbahn* in Betracht kommen, eine Bahn, die annähernd einem Drehpunkt oder, auf beide Kieferköpfchen bezogen, einer Drehachse gleichkommt.

Nach Bennett liegt dieser Drehpunkt in halber Höhe zwischen dem Gelenkkopf und der Okklusionsebene, hinter der Senkrechten, welche von der Mitte des Köpfchens auf die Okklusionsebene gezogen werden kann.

Auch Gysi hat später diese Lage bestätigt und fügt bei, daß die Lage dieser Drehachse individuellen Schwankungen um eine allgemeine Lage unterworfen sei. Max Müller schliesslich findet, dass die Achsen beider Gelenkköpfe nicht immer in der gleichen Höhe zu liegen brauchen. In den meisten Fällen könne man wohl von einer Intercondylenachse sprechen, in anderen jedoch sei es besser von einer Intercondylenlinie zu sprechen. Unter diesen Umständen würde sich dann der Punkt zwischen den Schneidekanten der vorderen Incisiven nicht in der Symmetrieebene des Kiefers, sondern schräg davon bewegen.

Für unsere Untersuchungen werden allerdings diese seltener vorliegenden Gegebenheiten keine grosse Rolle spielen. Wichtig ist, die Drehachse allgemein im schon erwähnten Punkt anzunehmen.

Der Drehpunkt dieses Hebelsystems ist nun bekannt und wir wollen uns mit den angreifenden Kräften, den Kaumuskeln und deren Krafrichtung, beschäftigen.

Die Bewegung des Unterkiefers ist nicht nur von der Form und der Bahn des Kiefergelenkes, sondern auch durch die an ihm inserierenden Muskelgruppen bestimmt. Denn aus ihrem Ursprung und Insertion können wir die Krafrichtungen konstruieren, die auf den Unterkiefer und, infolge des Kauvorganges, auch auf die Zähne, den Alveolarfortsatz des Oberkiefers und zudem noch auf das Kiefergelenk wirken. Die Aufzeichnung dieser Kraftvektoren, ihre Summation zu Resultierenden wie auch ihre Zerlegung in einzelne Komponenten werden uns wiederum besondere Gegebenheiten in mechanisch-statischer Hinsicht aufzeigen (Blatt 2).

Die in der Gegend des Gnathion ansetzenden Halsmuskeln, vor allem der musculus biventer, haben nicht nur eine den Unterkiefer öffnende, sondern auch eine rückziehende Wirkung, also gleich wie der temporalis. Dieser tritt, wie später dargelegt, lediglich in der ersten Phase der Unterkieferschliessbewegung zutage.

Die Muskelkraft hat nun nicht nur eine *Richtung*, sondern auch eine *Grösse*. Sie hat schliesslich auch eine *Wirkung*, den *Kaudruck*. Der tägliche Sprachgebrauch macht allerdings keinen genauen Unterschied zwischen den Begriffen Kraft und Druck. Physikalisch und auch experimentell muss genau zwischen ihnen unterschieden werden. Man sagt, dass auf eine Fläche eine Druckkraft wirkt, wenn senkrecht zur Fläche eine grosse Zahl von kleinen Einzelkräften wirken. Die Druckkraft ist die Resultierende dieser Einzelkräfte. Als Druck P auf eine Fläche F bezeichnet man die auf die Flächeneinheit entfallende Druckkraft. Es ist also $\text{Druck} = \text{Druckkraft} / \text{Fläche}$.

Demnach wird der Druck im physikalischen Einheitssystem mit der Einheit $1 \text{ dyn} \times \text{cm}^{-2}$, in der Technik mit der Einheit $1 \text{ kg} \times \text{cm}^{-2}$ gemessen.

Die Kraft hingegen ist die Ursache der Beschleunigung einer Masse und es gilt die Formel: $\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$.

Die Einheit ist daher $1 \text{ gr} \times 1 \text{ cm sec.}^2 = 1 \text{ dyn.}$

Die technische Einheit der Kraft ist definiert als das Gewicht der Masse 1 kg auf Meeresniveau.

In der zahnärztlichen Literatur werden diese beiden Begriffe ständig unter einander verwechselt, nicht zuletzt von jenen Forschern, welche sich eingehend mit der Messung des Kaudruckes beschäftigt haben.

Die Kaudruckmessung.

Kaudruckmessungen wurden schon seit Jahrzehnten von experimentell veranlagten Zahnärzten durchgeführt, mit wechselndem Erfolg und auch abhängig von den jeweils konstruierten Gnathodynamometern. Selbstverständlich sind solche Messungen, ob sie nun mit dem Hebelsystem, mit Federn, dem hydraulischen Druck von Flüssigkeiten oder unter Verwendung der Brinellschen Kugelprobe durchgeführt werden, immer eine sportliche Leistung des zu untersuchenden Patienten. Der physiologische Kauvorgang ist an und für sich ein recht komplexes Geschehen, das weder durch physikalisch feststellbare absolute Werte, noch weniger aber durch eine konstante Kaukraft gesteuert wird, die beim einseitigen Kauen rechts und links genau dieselbe ist. Diese letztere Annahme hat auch in den Gysi'schen Hebelgesetzen des Unterkiefers ihren Niederschlag gefunden.

Im allgemeinen wird doch die Muskelkraft an jener Stelle entwickelt, an der sie gerade gebraucht wird und durch recht differenzierte Eigenreflexe gesteuert, die schon beim Säugling einen Bestandteil des höchst komplizierten Saugreflexes bilden und dann, im Zeitpunkt des Erscheinens der Zähne ihrer neuen, anders gearteten Funktion angepasst werden.

Mehr zur Orientierung über die Grösse des Kaudruckes sei es mir gestattet, aus der reichlich hierüber bestehenden Literatur einige Angaben herauszugreifen, natürlich jene Tatsache unterstreichend, dass solche Zahlen reichlich vorsichtige Beurteilung erheischen.

Hauptmeyer und andere stellten fest, dass Zahnathleten eine „Kaukraft“ von 720 kg aufbrachten, ja es wurden teilweise noch höhere Werte angegeben. Diese Werte wurden allerdings dadurch

gewonnen, dass es diesen Zahnathleten gelang, Kerben in Stahlröhren anzubringen. Es wäre beizufügen, dass somit der Kaudruck beispielsweise über den Eckzahnsitzen — also einer Fläche von vielleicht $\frac{1}{10}$ mm² — wirkt, und dass es so leicht fällt, solche Werte zu erhalten.

Eine grosse Anzahl weiterer Messungen, die sich in normalen, einigermaßen mit den physiologischen Kaukraftgrössen übereinstimmenden Werten bewegen, wurden mit den verschiedensten Gnathodynamometern durchgeführt. So fanden:

Black	13,5 bis 122,5 kg
Bloch	250 kg
Rosenthal	40 bis 50 kg
Haber, bei Männern gemessen	
mittlerer Schneidezahn	25 kg
seitlicher Schneidezahn	23 kg
Eckzahn	36 kg
1. und 2. Prämolar	40 kg
1. Molar	72 kg
2. Molar	68 kg
3. Molar	48 kg.

Eine andere, verbesserte Methode schufen L. Köhler und O. Etling damit, dass sie die Brinell'sche Kugelprobe für Kaudruckmessungen benützten. Sie liessen eine Stahlkugel in ein Bleiplättchen einbeissen und konnten somit den entwickelten Druck durch die Ausmessung der eingepprägten Delle bestimmen. Ihre gefundenen Werte sind:

Schneidezähne	20—32 kg
1. Prämolar	25—38 kg
2. Prämolar	24—50 kg
1. Molar	32—60 kg
2. Molar	35—62 kg
3. Molar	26—30 kg

Eine weitere Gruppe von Forschern, unter ihnen Gysi, Fick und E. Weber gingen von anderen Voraussetzungen aus. Wie ein Gummistrang, der aus lauter Gummifasern besteht, umso tragfähiger ist, desto dicker er wird, so wird sich auch die Kraft

eines Muskelbündels gemäss der Anzahl der in ihm enthaltenen Fibrillen — der mechanischen Muskeleinheit — verhalten. Die Physiologen bezeichnen die absolute Muskelkraft (eines willkürlichen Muskels) als jene Kraft, die bei maximaler Reizung pro cm² Querschnitt wirksam wird. Diese Kraft wird beim Menschen mit durchschnittlich 10 kg angegeben. Die Kaumuskeln wurden nun herauspräpariert und ihr Querschnitt gemessen. Gysi fand:

musculus temporalis	Q = 4,3 cm ² K = 43 kg
musculus masseter	Q = 3,87 cm ² K = 38 kg
musculus pterygoideus medialis	Q = 2,3 cm ² K = 23 kg
musculus pterygoideus lateralis	Q = 4 cm ² K = 40 kg

Abgesehen davon, dass E. Weber andere Querschnitte fand, für den Masseter z. B. 7 cm² und für den musculus pterygoideus medialis 4,9 cm², so ist auch die Frage umstritten, ob der musculus temporalis, trotz seiner verhältnismässig grösseren Dicke, auch wirklich der stärkste Kaumuskel ist. Nehmen wir als Ursache einer Endpresskraft eine Kaumuskelresultante von 50 kg und den senkrechten Abstand dieser Resultante vom Kieferdrehpunkt mit 4 cm, also ein Drehmoment von 200 kg cm an, so erhalten wir nach der Formel:

Kraft $\times$ Kraftarm = Last $\times$ Lastarm folgende Werte:

3. Molar	40 kg
2. Molar	33,3 kg
1. Molar	28,5 kg
2. Präemolar	25 kg
Eckzahn	22,2 kg
mittlerer Schneidezahn	20 kg.

Diese Werte gelten allerdings, und dies auch nur annäherungsweise, bei der Annahme, dass die Kaukraft nur einer Kieferseite sich in Tätigkeit befinde — aber sie sind doch nicht allzu verschieden von jenen Grössen, welche mit den Gnathodynamometern gefunden werden.

Die modernste Art der Kaudruckmessung scheint jene zu sein, welche von Rus veröffentlicht wurde. Ausgehend von der Annahme, dass der Maximaldruck durch die Schmerzempfindlichkeit des Periodontiums begrenzt sei, hat er bei vielen Patienten

mit normalem Periodontium, und zwar klassifiziert nach Geschlecht und Alter, Messungen durchgeführt. Zugleich bemerkt Rus, dass die Messungen, wie sie von Haber, Köhler und anderen durchgeführt wurden, nicht miteinander vergleichbar wären, weil sie bei verschiedenen Oeffnungswinkeln der Kiefer durchgeführt wurden, wodurch die bei der Entwicklung der Kaukraft entstehenden Komponenten verschiedene Richtungen bekämen.

Der Messapparat von Rus beruht nun auf dem Prinzip des Mikrophons, wo durch Druck Widerstandsänderungen hervorgerufen werden. Diese Widerstandsänderungen misst Rus mit einer Messbrücke von Wheatson, welche empirisch bis zu 120 kg Druck geeicht ist. Die von Rus gefundenen Drucke sind tiefer als jene, die bis jetzt in der Literatur angegeben wurden, obschon auch sie sich proportional dem Abstand vom Kieferdrehpunkt verhalten. Zugleich rechnet er den gefundenen Druck auf die Oberfläche der Zahnwurzel um — weil ja Messungen inbezug auf belastete Fläche der Wurzel und Richtung des Kraftvektors mehr sagen, als Messungen der absoluten Grösse des Drucks an irgendwelchem Punkt der artikulierenden Kronenoberfläche. Leider gibt er nicht an, wie er diesen Druck auf die Oberfläche umgerechnet hat. Es ist wohl anzunehmen, dass Rus einfach Druck durch Oberfläche (welche z. B. Cieszynski gemessen hat) dividiert hat.

Das physiologische Mittel liegt nach Rus ungefähr bei 100 gr pro mm² Periodontium.

Abschliessend sei bemerkt, dass die meisten dieser Messungen das Ergebnis einer augenblicklichen sportlichen Leistung bedeuten und darin nicht von Dauer und Richtung der einzelnen Komponenten etwas gesagt wird.

Die allgemeinen Krafrichtungen beim Kauen.

Nachdem wir uns mit der Richtung der im Kiefergebiet vorliegenden Kräfte befasst haben, wollen wir uns nun der Betrachtung jener mechanischen Vorgänge zuwenden, welche besonders während der Durchkauung der Nahrung in Erscheinung treten. Es ist dies von besonderer Wichtigkeit, weil ja die Kaufunktion die Haupttätigkeit des Gebisses darstellt. Dennoch werden in sehr vielen Veröffentlichungen über die Fragen der Artikulation

und die Belastung des Gebisses nur jene Erscheinungen behandelt die beim Leerlauf des Gebisses, also beim Schlussbiss, beim Seit- und Vorbiss sich zeigen. Selbstverständlich liegt es in der Natur des Gebisses und des Kiefergelenks, alle diese erwähnten Bewegungen auszuführen, aber weit entfernt sind diese Bewegungen von der physiologischen Kraftentfaltung des Kauapparates.

Wenn wir uns nun vorstellen wollen, wie die physiologische Beanspruchung des statischen Systems des Kauapparates sich abwickelt, so müssen wir vorerst jene Bewegungen betrachten, die sich bei der gewöhnlichen funktionellen Beanspruchung abspielen.

Beim Kauen wird sich der Unterkiefer, um einen genügenden Abstand von den oberen Zähnen zu haben und um die Nahrung ergreifen und verkleinern zu können, vorerst etwas senken. Diese erste Bewegung ist beim Abbeissen regelmässig mit einer Vorschubbewegung des Unterkiefers verbunden. Beim eigentlichen Kauen jedoch geht diese Bewegung in seitlicher Richtung und zwar nach jener Seite hin, wo sich der jeweilige Bissen befindet. Haben die Zähne nun den Bissen erfasst, so erfolgt ruckartig, mit mehr oder weniger Kraftentfaltung der am Kauvorgang jeweils beteiligten Kiefermuskeln, das Zusammenbeissen. Je nach der Stelle, wo sich der Bissen befindet, erfolgt diese Bewegung in radialer Bewegung von unten aussen nach oben innen und zwar in jener Richtung, welche auch der mechanischen Zahnachse entspricht. Loos und auch Zsigmondy, welche über die Art und Weise des Kauvorganges eingehende Untersuchungen durchführten, haben diese Richtung als Normalschlussrichtung bezeichnet. Diese Bewegungen entsprechen nun dem tatsächlichen Kauvorgang, was sich nicht nur aus der genauen Beobachtung des Kauvorganges, sondern auch aus der Achsenrichtung der Zähne und dem Bau des Zahnabstützapparates ergibt. Wir werden im Folgenden uns eingehend mit diesem Phänomen zu befassen haben.

Es waren nun allerdings Meinungsverschiedenheiten darüber entstanden, ob sich diese Bewegung nur in Form eines Dreieckes (Zsigmondy) oder auch eines Viereckes (Gysi) abspielte. Gysi nennt das den Rundbiss und nimmt an, dass diese Bewegung hauptsächlich für faserige Nahrungsmittel wie Fleisch und dergleichen in Erscheinung trete.

Gysi gelangt nun (in derselben Richtung wie Zsigmondy) auf die Höckerstellung der Molaren, welche dann gegenseitig in die zentrale Okklusion abgleiten und somit eine die Fleischfasern zermalmende Tätigkeit ausüben. Diese Kauart wird allerdings nur in wenigen Fällen zu beobachten sein. Denn dieses Kauen, das einem Hineinknirschen in die zentrale Okklusion gleichkäme, würde mit der Zeit nicht nur unangenehm, sondern auch unter Umständen schmerzhaft werden und würde bestimmt eine Schädigung des Paradontiums durch die auftretenden Drehmomente nach sich ziehen.

In Anbetracht der heutigen Nahrungsmittel-Zubereitung und der nachlässigen und oberflächlichen Kaugewohnheiten des zivilisierten Menschen wird sich weiter eine dritte Art von Bewegungsablauf den bereits erwähnten beigesellen, nämlich jene, bei welcher die Zähne wohl in den Bissen hineingetrieben werden, aber in ihm stecken bleiben, sodass es gar nicht zu einem Kontakt der Antagonisten kommt. Die normale Schlussbissrichtung und die Richtung der Kraft zugleich wird beibehalten. Durch die Tatsache, daß wir in den Nahrungsmitteln, wenn sie nicht in rohem Zustande gegessen werden, unelastische Körper — im Gegensatz zu den harten und elastischen Zahnschubstanzen — und somit beim Kauen eine Art von unelastischem Stoss vor uns haben, soll die auftretende Energie ganz in Formänderung der Bissen umgewandelt werden, ohne dass damit die Abstützvorrichtungen des Gebisses sonderlich belastet würden.

Die Kraftkomponenten beim Kauen.

Nachdem wir die Art und Weise des Kauvorganges, wie auch die Wirkungsweise der dabei beteiligten Muskelgruppen, sowie deren Kraft, soweit diese überhaupt berechenbar und messbar ist, aufgezeigt haben, werden wir uns nun jenen mechanischen Phänomenen zuzuwenden haben, die dann entstehen, wenn sich ein Bissen zwischen den Zahnreihen befindet. Wir werden die entstehenden Kraftkomponenten aufzeichnen, die bei der physiologischen Tätigkeit des Gebisses auftreten. Sobald nun durch die Zunge sich ein Bissen zwischen die Zähne eingeschoben, und zugleich auch der Unterkiefer sich ein wenig geöffnet hat, beginnt

die Kaumuskulatur, also der musculus masseter, temporalis sowie der pterygoideus medialis, in Tätigkeit zu treten. Ob diese Bewegung eine rein sagittale oder eine schräge seitliche Aufwärtsbewegung ist, wird dadurch bestimmt, aus welcher Anfangslage sie erfolgt. Der Unterkiefer wird zu einem einarmigen Hebel.

Bevor wir uns mit den geometrischen Konstruktionen der im Kauorgan auftretenden biomechanischen Vorgänge befassen, sollen einige Grundbegriffe über die *Zusammensetzung von Kräften* angeführt werden. Wenn an einem Körper mehrere Kräfte einwirken, so kann man auf sie, da sie auch Vektoren, also gerichtete Grössen, sind, die Gesetze der Vektorrechnung anwenden, und deshalb mit ihnen auf Grund der Polygon- und Parallelogramm-Konstruktion verfahren. Dies beruht vor allem auf dem schon von Newton gefundenen Unabhängigkeitsprinzip, welches besagt, dass sich die Wirkung mehrerer gleichzeitig wirkender Kräfte überlagern, und dass ihre gemeinsame Wirkung gleich der Summe der Wirkungen ist, welche die Kräfte einzeln hervorgebracht haben würden.

Die Addition von Kräften, die am selben Punkte eines Körpers angreifen, wird mit Hilfe des Kräfteparallelogramms durchgeführt. Im Falle, dass die Kräfte nicht denselben Angriffspunkt haben, ist es bei starren Körpern zulässig, den Angriffspunkt längs seiner Wirkungslinie beliebig zu verschieben.

Bei Kräften, die nicht in derselben Ebene liegen, kann man mit konstruktiven antiparallelen Kräften die resultierende Einzelkraft finden.

Nach diesem Ueberblick über die Art und Weise, wie mit Kraftvektoren graphisch gerechnet werden muss, wollen wir uns nun den im menschlichen Kauorgan gegebenen Verhältnissen zuwenden.

Vorerst wollen wir nun die gewöhnliche Schliessbewegung betrachten, und zwar soll sich das Gnathion zunächst in der medianen Sagittalebene befinden, und der Kiefer zugleich in der maximalen Oeffnungslage. Bei der nun einsetzenden Tätigkeit der Kaumuskulatur wird zuerst das Kiefergelenkköpfchen eine rückläufige Bewegung ausführen, wobei in gleicher Richtung der discus articularis mitgenommen wird. Einerseits kommt die nach

rückwärts laufende Bewegung dadurch zustande, dass die Resultierende der Muskelgruppen nicht senkrecht zu der Kondylenbahn steht und somit eine nach rückwärts schiebende Komponente auftritt. Andererseits wird diese Bewegung auch durch die fast wagrecht liegenden Fasern des breiten musculus temporalis wie auch die Zugrichtung des musculus pterygoideus medialis hervorgerufen. Diese Bewegung wird nun so lange weitergeführt, bis die Kondylen in ihrer Ruhelage in der fossa articularis angelangt sind. In der nun eintretenden Schlussphase ist auch die stark wandernde Drehachse des Unterkiefers zu einer ziemlich stabil liegenden Drehachse geworden. Erst jetzt tritt der musculus masseter in den Zustand seiner gesteigerten Kraftentwicklung, was schon aus seiner Lage ersichtlich ist: Befindet sich doch seine Insertion ganz in der Nähe seiner Kraftentfaltung, sodass durch die ähnliche Grösse des Hebelarms Masseter-Drehpunkt und Bissen-Drehpunkt die ganze Kraft sich in Formänderungsarbeit auswirken kann. Der musculus temporalis wird, obwohl er, verglichen an seinem weit ausgedehnten Ursprungsfeld, öfters als der eigentliche und stärkste Kaumuskel angesehen wurde, nur eine untergeordnete Rolle im Kauvorgang spielen. Ist doch sein Ansatz recht nahe am Drehpunkt und in Bezug auf die Kauwirkung recht unrationell angeordnet. Angenommen, er wäre wirklich der stärkste Kaumuskel, so würde in erster Linie nicht der Bissen zerquetscht, sondern das Köpfchen in den discus hineingepresst, wodurch das Gelenk bald einer Drucklaesion zum Opfer fallen würde.

Die Anwendung dieser oben festgehaltenen Sätze (soweit diese die Rechnung mit Kraftvektoren betreffen) auf das System der Kaufunktion, bietet allerdings gewisse Schwierigkeiten. Vor allem sind die aufzuzeichnenden Krafrichtungen mannigfachen individuellen Verschiedenheiten unterworfen, es seien nur genannt:

- die verschiedenen Bissarten (Scherenbiss, Zangenbiss, prognathe und progene Bisse),
- die Vollständigkeit oder Unvollständigkeit des Gebisses,
- der Verlauf der Gelenkbahnen und zudem ihre beidseitige Verschiedenheit,

- der Verlauf der Bahn des Kiefer-Rotationspunktes und ihre ebenfalls verschiedene Lage beidseits,
- die individuell verschiedene Lage von Ursprung und Insertion der Kaumuskeln und somit die verschiedene Lage von sich ergebenden Resultanten und Komponenten,
- die Stärke der Kaumuskulatur,
- die reflektorische Steuerung und höchst fein differenzierte Innervierung der Kaumuskeln,
- der Zustand der Zähne und ihres Aufhängeapparates.

Es soll nun allgemein an einem Fall, der sich lediglich möglicher Mittelwerte bedient, die geometrische Konstruktion des Kaukraftsystems dargestellt werden.

Zur Vereinfachung und Darlegung wollen wir vorerst jene Möglichkeit annehmen, dass sich der zu zerteilende Bissen in der Sagittalebene, also zwischen den oberen und den unteren Incisiven befinde, eine Lage, die speziell zum Abbeißen der Nahrung gebraucht wird. Es wäre somit auch möglich, die beidseitig wirkenden Muskelkräfte in die Sagittalebene zu verschieben und zwar auf jene in der Sagittalebene liegende Gerade, welche den Durchstosspunkt der Verbindungslinie der beiden Kieferdrehpunkte mit dem Mittelpunkt des kugelförmig angenommenen Bissens verbindet.

Das ganze so gedachte System würde somit ungefähr dem gleichseitigen Bonwill'schen Dreieck gleichkommen, welches man sich allerdings in die Sagittalebene projiziert denken muss, gleichzeitig mit dem konstruierten Hebel Bissen-Muskelansatz-Drehpunkt. Zugleich befindet sich die Resultierende der Muskelkräfte in dieser Sagittalebene, die allerdings nicht senkrecht auf die erwähnte Verbindungslinie oder auf die Höhe dieses Dreieckes einwirkt, sondern immer in einem anderen Winkel zu ihr steht. Die Richtung dieser Resultante wird occipitalwärts gerichtet einen spitzen Winkel einschliessen. Es ergibt sich nun die Möglichkeit, die Resultante R sofort in Bezug auf diese Gerade in zwei Komponenten zu teilen. Die eine davon steht senkrecht auf dieser Verbindungslinie Bissen-Drehpunkt K 2, die andere Komponente jedoch wird sich als rückschiebende Kraft äussern K 1. Die

Mandibula wird nun, indem sie sich um den Drehpunkt dreht, einerseits gegen den Bissen und andererseits gegen den Berührungspunkt von condylus und tuberculum articulare gepresst.

Selbstverständlich hängt die Grösse und Richtung dieser Kräfte hauptsächlich davon ab, an welchen Punkten dieses Hebelsystems die Muskelkräfte angreifen. Es müssen jedoch diese Kräfte in den vorliegenden anatomischen Gegebenheiten ihren Niederschlag finden, sei es, dass die Gestalt von Condylus, Discus und Tuberculum articulare durch die Kräfte beeinflusst wird oder dass vor allem die Form der Zahnwurzel, die Richtung ihrer Achse und die Art und Weise ihrer Verankerung im Knochen sich nach diesen Kräften zu richten haben.

Der erwähnte Vorgang wird sich nun so lange in eben dieser Weise abspielen, bis der Bissen durchtrennt ist und die Zahnreihen sich nunmehr in der zentralen Okklusion befinden. Zugleich hat sich auch der condylus mitsamt dem discus articularis durch die rückschiebende Komponente gegen sein Widerlager verschoben.

Es ist nun offensichtlich, dass die Darstellung dieser Kräfte, selbst unter der Annahme, dass sich der Bissen genau in der medianen Sagittalebene befinde, nicht so einfach ist. Schwieriger wird es dann, wenn wir den Bissen in der Gegend der Prämolaren oder Molaren annehmen. Vor allem, weil dann die Muskulatur der Arbeitsseite in überwiegender Masse tätig ist und die Muskulatur auf der Balancierseite den condylus im Gelenk zu fixieren hat.

Wir haben von neuem die Resultante der beidseitig wirkenden Muskelkräfte auf die Höhe dieses Dreieckes zu konstruieren, wobei sich die Spitze des Dreieckes jeweils im Mittelpunkt des Bissens befinden möge.

Wir haben demnach folgende Konstruktionen durchzuführen:

- 1) Projektion der Muskelkräfte auf die Mittellinie des Dreieckes
= R,
- 2) Zerlegung dieser Resultierenden in eine Schub- und eine Druckkomponente K 1 und K 2,

- 3) Zerlegung dieser Druckkomponente in zwei weitere Komponenten, wovon die eine im Kiefergelenk, die andere auf den Bissen wirkt K 3 und K 4,
- 4) Die auf den Bissen wirkende Komponente soll zusammen mit der nach rückwärts schiebenden Komponente zu einer Resultierenden vereinigt werden.

Diese Resultierende wird *in die Richtung der Zahnachsen* des Oberkiefers weisen. Da aber $\text{actio} = \text{reactio}$, haben wir die Möglichkeit, auch die Kraft für die Zähne des Unterkiefers zu zeichnen. Ein Blick auf die zusammenfassende Abbildung lässt folgende Merkmale erkennen (Blatt 3):

Die Krafrichtungen des Oberkiefers convergieren nach einem Punkt oder nach Punkten, die sich in der Gegend der Glabella befinden. Die Lage dieser Punkte ist abhängig von der Lage des Kieferdrehpunktes, von der Insertion der Kaumuskulatur und von der Gestalt der Bissebene, die natürlich in den wenigsten Fällen der Spee'schen Kurve entsprechen dürfte.

Die Zahnachsen des Unterkiefers sind fächerförmig angeordnet, und zwar wird ihr Winkel zur Frankfurter Horizontalebene immer spitzer, je weiter sie molarwärts liegen. Der dritte Molar wird so schliesslich auch seine übermässige Neigung erhalten, da er seine Wurzeln nach dem Unterkieferwinkel hin richtet.

Nach diesen allein aus den entstehenden Kraftvektoren abgeleiteten Wurzelrichtungen ist es nicht notwendig, die fächerförmige Auseinanderspaltung der Wurzeln, wie sie sich uns im Unterkiefer darbieten, aus dem Wachstum des Unterkiefers oder gar allein aus der sagittalen Okklusionskurve zu erklären. Denn das Wachstum dieses Knochens und seine Veränderungen sind wiederum das Resultat seiner Funktion und der Einwirkung von Kräften. Die am Zahn einwirkende Kraft beeinflusst die Richtung der Wurzeln und somit auch das Ausmass des Interstitialwachstums der umgebenden Knochensubstanz — unterstützt von der regulierenden Tätigkeit innersekretorischer Organe — und nicht umgekehrt.

Im gleichen Sinne verläuft auch die sagittale Okklusionskurve in Form einer unregelmässigen Kurve verschiedener Krümmung je nach der Belastung im betreffenden Kieferabschnitt.

Auch sie ist individuell wie die sagittale Kurve des Unterkieferbogens und beide sind abhängig von der Arbeit einzelner Zahngruppen, die bestimmt wird von Ansatz und Kraft der Muskeln und vom Kieferdrehpunkt. Aus diesen individuell recht grossen Unterschieden ist auch zu erklären, weshalb viele Forscher ganz verschiedene Resultate fanden.

Der erste, welcher sich mit dem Wesen der Okklusionskurve auseinandersetzte, war der Anatom Spee. Er nahm an, diese Kurve sei ein Kreisabschnitt, auf dem zugleich die vordere Fläche des Gelenkkopfes liege. Das Zentrum dieses Kreises bildet nach den Untersuchungen von Spee ein Punkt, der in der Projektion des Orbitazentrums liegen soll. Weiterhin bestimmte auch Christensen das Zentrum der Okklusionskurve im Gebiet des Schläfenknochens. Die Amerikaner, vor allem Monson, Hall und Wodsworth machten sich daran, das Zentrum rechnerisch zu ermitteln. Wilson kann sogar mit einer „Formel“ die Radiuslänge der Okklusionskurve berechnen. Andere fanden das Zentrum in der Gegend der crista galli.

Aus diesen verschiedenen Resultaten ergibt sich, dass die Frage dieser Kurve auch bis heute noch nicht gelöst ist, ein Beweis dafür, dass es eben kein einzelnes Zentrum gibt, und dass die verschiedenen Zentren individuellen Schwankungen unterworfen sind. Es scheint zugleich auch unmöglich, einen Zusammenhang zwischen Neigung der Gelenkbahn und Okklusionskurve zu finden, wie auch zwischen dieser sagittalen Kurve und irgend einem Punkte, der dieser Kurve als Zentrum dienen könnte.

Wenn es auch gelingt, die Lage der Zahnachsen in der sagittalen Ebene durch die Konstruktion der Kraftkomponenten aufzuzeigen, so ist es umso schwieriger, die Neigung der Achsen in der Frontalebene konstruktiv zu erklären. Wie oben dargetan, ist diese Neigung hauptsächlich vom Kauvorgang selbst abhängig, und zwar vom Ausweichen des Unterkiefers nach der Arbeitsseite hin. Diese Neigung ist die Folge der Schliessbewegung, die von unten aussen nach oben innen erfolgt.

Die bisherigen Ausführungen sollen daher in folgende Punkte zusammengefasst werden;

Die Stellung des Zahnes — was in Winkeln zur Frankfurter Horizontalebene, Medianebene und Orbitalebene ausgedrückt werden kann — ist die *Resultierende der auf ihn wirkenden Kräfte*. Dasselbe gilt natürlich auch für die Stellung des Zahnes relativ zur Okklusionsebene. Diese Kräfte sind vor allem jene, mit welchen der Zahn auf Grund dieses zweckgebundenen Daseins aufs engste verbunden ist: *Die Kräfte der Kaumuskulatur und ihre durch die Form des Kauapparates vorgeschriebene Richtung*. Wenn auch die an der Krone des durchgebrochenen Zahnes angreifenden Kräfte den hauptsächlichsten Einfluss auf die Zahnstellung haben, sind auch jene, die den Zahn in der nunmehr eingenommenen Stellung halten — nämlich die inneren Widerstände — nicht zu unterschätzen. Diese halten das Gleichgewicht zu den äusseren aktiven Kräften, denen sich auch die Wanderungstendenz zur Mittellinie hin beigesellt.

Selbstverständlich kann somit die Stellung des Zahnes nicht nur durch die Aenderung der äusseren Kräfte geändert werden: Aenderungen des inneren Widerstandes haben dieselbe Wirkung. So beobachtet man die Kippung der Zähne in Extraktionslücken, was als Folge des Wegfalles der approximalen Abstützung gewertet werden kann. Die Abnahme des Widerstandes im Verlauf des menschlichen Alterungsprozesses wird vor allem auch im Schneidezahngebiet durch den schlecht ausbalancierten Ueberbiss zuerst zur Lockerung führen. Es sei denn, es werde durch die natürliche Verkürzung des koronalen Hebelarmes der Widerstandsabnahme des Stützgewebes Rechnung getragen, nämlich durch die Abrasion oder künstliche Verkürzung durch parodontoseprophylaktische Massnahmen unter gleichzeitiger Vergrösserung des intraalveolären Widerstandsarmes. Kurz ausgedrückt ist jeder Zahn, der *ein Hebelsystem darstellt*, falsch belastet und wird, sobald die Hebelkräfte grösser als die biologischen Widerstände des Abstützgewebes werden, durch Kippung und Lockerung verloren gehen.

Es ist wohl anzunehmen, dass die Zahnachsenrichtung des normalen Gebisses schon von vornherein so gestaltet ist, dass solche schädliche Belastungen nicht entstehen können, sondern dass sie weit eher den oben auf konstruktivem Wege erhaltenen Achsenrichtungen entsprechen wird.

Wir werden uns daher der Ausmessung der Zahnachsenrichtung an Profil- und Röntgenbildern zuwenden. Untersuchungen in dieser Richtung wurden vor allem auch von A. Cieszyński durchgeführt.

Cieszyński's Untersuchungen waren zwar hauptsächlich von jenem Ziele beseelt, eine auf den Regeln der Mechanik und Statik sich stützende Aethiologie der Kieferdeformitäten auszubauen; schreibt er doch selber: „Es besteht für mich kein Zweifel darüber, dass die Regeln der Statik, welche beim Ausbau des normalen Gesichts- und Gehirnschädels ihre Geltung haben, auch auf Kieferdeformitäten übertragen werden können und dass letztere nun als die Varietäten funktioneller Ausbildung abnorm wirkender Kräfte anzusehen sind.“ Weiter schreibt Cieszyński: „Die Einstellung der Zahnachsen in den Kiefern ist das funktionelle Resultat der Kaumuskelfraft, hauptsächlich des *musculus masseter* und *musculus pterygoideus medialis*, welches vom Unterkieferkörper nach der Glabella hin zum Ausdruck kommt.“

Die Folgerung, die Cieszyński daraus zieht, stimmt allerdings nicht: „Der Kaudruck kommt an der Spitze des darstellbaren Gebisskegels, welcher durch die Verlängerung der Zahnachsen gebildet wird, zum statischen Gleichgewicht, d. h. an der Spitze der Gebisskegel wird der beiderseits auf die Zähne einwirkende Kraftdruck amortisiert.“

Nach meiner Meinung geht es gar nicht darum, den Kaudruck zu amortisieren — umso weniger, da die Geraden einen Winkel miteinander einschliessen. Wichtiger ist es, die im Verlauf dieser Geraden befindlichen Abstützvorrichtungen zu betrachten, und zugleich die Lage dieser Gebisskegel mit den sich aus der Tätigkeit der Kaumuskulatur ergebenden Kraftkomponenten zu vergleichen.

Um sich über den Verlauf der Zahnachsen zu orientieren, wird es am günstigsten sein, diese in Profil und occipito-facialen Röntgenaufnahmen einzuzeichnen und diese zugleich mit der Frankfurter Horizontalebene und der Medianebene in Relation zu bringen. Die Zahnachsen können natürlich ebenfalls an Schnitten durch orthognathostatische Modelle annähernd ausgemessen werden.

Vergleich der Winkel der Zahnachsenrichtung zur Frankfurter Horizontalebene bei normalem Biss:

Zahn	durch Konstruktion der Kaukraftkomponent.	Cieszynski nach durchsäigten orthognathostatischen Modellen	Korkhaus A. M. Schwarz nach Profilröntgenbildern. Durchschnittswerte aus verschiedenen Bildern.	
Oberkiefer				sind in Fernröntgen Bildern schwierig zu beurteilen
1	110°	110°	110°	
2	100°	95°		
3	100°	95°		
4	95°	90°	90°	
5	90°	85°	85°	
6	80°	80°	80°	
7	77°	74°	75°	
8	75°	72°		
Unterkiefer				sind in Fernröntgen Bildern schwierig zu beurteilen
1	115°	110°		
2	100°	105°		
3	100°	100°	110°	
4	100°	90°	100°	
5	110°	100°	100°	
6	110°	100°	100°	
7	110°	100°	110°	
8	125°	120°	120°	

Es zeigt sich hier eine gewisse Uebereinstimmung zwischen den gemessenen und errechneten Werten.

Die Einstellung der Zahnachsen ist also das Resultat funktioneller Kräfte, vor allem jener, welche aus der Tätigkeit der Kaumuskulatur hervorgehen. Eine kleine, untergeordnete Rolle spielen Lippen und Wangenmuskulatur, sowie die Muskulatur der Zunge, sofern wir es mit einem normalen Biss zu tun haben.

Es gelten auch hier die gleichen Grundsätze und Eigentümlichkeiten, wie sie bei jeder bautechnischen Konstruktion gültig sind, nämlich, dass die Belastungskraft mit der Zahnachse zusammenfallen muss. Jeder Bauingenieur wird auch bei der Konstruktion von Brückenträgern, von Säulen oder bei Stahlkonstruktionen bestrebt sein, dass die Achsen dieser Träger mit der Richtung der Belastungskraft zusammenfallen. Natürlich haben wir es im Organismus mit lebenden Geweben zu tun und nicht mit totem Material, aber trotzdem gelten auch hier die mechanischen Gesetze, die zur Ausmerzung von schädlichen Kräften (Schubkräfte, Biegungskräfte) notwendig sind. Geradezu unverstänlich erscheint mir daher die Folgerung, welche Asari Katz in seiner Veröffentlichung: „Architektur des Unterkiefers im Zusammenhang mit der Lage der Wurzeln“ gezogen hat. A. Katz schreibt über die Richtung der Zahnachsen Folgendes: „Indem wir die Zahnachsen sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer bei ihrer Funktion beobachten, können wir uns davon überzeugen, dass die Krafrichtung *nicht* mit der Zahnachse bei beliebiger Lage des unteren Kiefers zusammenfällt. Betrachten wir die Richtung der Zahnwurzeln des Ober- und Unterkiefers, so können wir uns leicht davon überzeugen, dass selten ein Zahn so gestellt ist, dass die Richtung der Kraft mit der Achse des betreffenden Zahnes zusammenfällt. Die bukkalen Zähne des Oberkiefers sind lateral geneigt, die des Unterkiefers medialwärts. Hieraus ist ersichtlich, dass die Achsen dieser Zähne nicht in sagittaler Ebene — in der sich die Richtung der Kraft verteilt — gelagert sind, sondern mit dieser Ebene einen gewissen Winkel bilden.“

Abgesehen davon, dass sich eine Krafrichtung nicht in einer Ebene „verteilt“, habe ich durch obige Darlegungen erklärt, weshalb diese Neigung der Achsen zustandekommt, und wie sie mit der Bahn des Kauvorganges zusammenhängt.

Eine weitere Folgerung von Katz ist daher noch in vermehrtem Masse abzulehnen: „Das Zusammenfallen der Krafrichtung mit der Achse eines Zahnes setzt die Arbeitsfähigkeit des letzteren herab“. Katz beweist dies durch die Tatsache, dass beim Zerkleinern harter Bissen und insbesondere beim Aufknacken von Nüssen und dergleichen, bei welcher Tätigkeit vor allem die

Praemolaren angewendet werden, der Unterkiefer nach der Seite hin verlagert wird.

Dagegen ist zu erwidern, dass der Unterkiefer eben deshalb nach seitwärts verschoben wird, um die Achse einzuhalten. Dazu kommt die Möglichkeit, den gesamten Kaudruck auf die scharfe Höckerspitze der Bicuspidaten zu konzentrieren, so dass hier äussere Arbeit und Drehmoment zu einem Minimum werden.

Diese Kaubewegung wird aber nicht nur bei einem harten Bissen angewendet, sondern auch bei der gewöhnlichen, durch Kochen vorbereiteten Nahrung, welche infolge ihres Wassergehaltes als ein hydraulisches System aufgefasst werden kann. In diesem Fall breitet sich der Druck auf das ganze Zahnrelief gleichmässig aus, unabhängig von der Form desselben, solange noch keine Okklusion vorhanden ist. Man braucht die sehr differenzierte Form der Höcker nicht zu beachten, sondern lediglich deren wirksame Oberfläche (Fläche auf der Ebene, die senkrecht zur Kraftrichtung steht).

Eine andere Tätigkeit dieses Gebisses, die wir bis anhin noch nicht näher erörtert haben, ist das Knirschen. Unter Knirschen versteht man allgemein eine Bewegung der Zahnreihen gegeneinander unter mehr oder weniger starker Kraftentfaltung, sodass objektive Geräusche entstehen. Das Knirschen wird als ein Sympton einer körperlichen Anstrengung, einer psychischen Erregung oder auch unbewusster seelischer Affekte während des Schlafes angesehen.

Die Knirschbewegung hat, wie der Kauakt, insofern einen Einfluss auf die Achsenrichtung der Zähne — obschon diese Tätigkeit nur beschränkt als eine physiologische Belastung des Gebisses angesehen werden kann — dass ein Kippmoment auf die belasteten Zähne entsteht, weil beim Knirschen der Druck von den sich berührenden Zahnhöckern aufgefangen wird. Diese Belastung führt nun zu einer Lockerung, eventuell Stellungsänderung dieser Zähne.

Eine in jedem Zahn-Röntgenbild, vor allem der Molaren, sich offenbarende Tatsache will nun mit den auf den vorhergehenden Konstruktionen gefundenen Achsenrichtungen nicht recht übereinstimmen. Es ist die *Krümmung der Wurzeln im apikalen*

Drittel. Schon Lenhossék unterscheidet zwei Wurzelformen, die geraden und die krummen und nennt sie *radix rectilinea* und *radix curvilinea*. Mühlreiter und später Schröder haben die Wurzelformen untersucht. Dabei ergab sich, dass die bukkalen Wurzeln der oberen Molaren in der Mehrzahl aller Fälle verschiedene Wurzelachsenrichtungen aufweisen (53%), 30% zeigen Verwachsungen und nur bei 15% hielten beide Wurzeln eine geradlinige und zueinander parallele Richtung ein. Die oberen Sapietes gar zeigen alle ein sehr abweichendes Verhalten. Was allerdings verständlich ist, wenn wir bedenken, dass diese Zähne eben nur zum geringsten Teil eine Kaufunktion aufweisen, so dass auch nicht die richtungsweisende Kraft der Kaumuskulatur auf sie einwirken kann. Dazu kommt der Platzmangel bei den oberen dritten Molaren im Alveolarfortsatz.

Auch bei den unteren Molaren stimmen die Wurzelachsen nur in seltenen Fällen mit der allgemeinen Zahnachsenrichtung überein. Die mesiale breite Wurzel wendet sich nach mesial, um erst im apikalen Drittel nach distal sich abzukrümmen. Beide Wurzelachsenrichtungen weichen in einem spitzen Winkel von der allgemeinen Achsenrichtung ab. Sehr oft hat auch die distale Wurzel eine apikale Krümmung.

Beim oberen Molar verläuft also die allgemeine Achsenrichtung in der Richtung der dicken palatinalen Wurzel. Der ganze Zahn erscheint uns wie ein dreibeiniges Schemel.

Beim unteren Molar verläuft die Zahnachse in ungefährer Richtung der distalen Wurzel.

Für die *Entstehung des Wurzelmerkmals* werden verschiedene Begründungen angeführt. Auf jeden Fall steht fest, dass die Richtung der Zahnachse besteht, bevor das Wurzelmerkmal ausgebildet wird. Das Wurzelmerkmal kann aber auch fehlen oder für die verschiedenen Zähne derselben Kieferhälfte sehr verschieden sein. Am einleuchtendsten erscheint mir diese Begründung, dass das Wurzelmerkmal eine Folge der die Zähne versorgenden Blutgefäße sei. Die Blutgefäßrichtung kann aber keinen Einfluss auf die statische Richtung der Krone und der oberen Abschnitte der Wurzel haben, und daher braucht das Wurzelmerkmal auch nicht statisch berücksichtigt zu werden.

Zugleich ist die Epithelscheide des sich entwickelnden und nachher durchbrechenden Zahnes so gross, dass deren Wachstumsrichtung nur von der Funktion des Zahnes, nicht aber von den versorgenden Gefässen beeinflusst werden kann. Erst in späteren Entwicklungsabschnitten der Wurzel beginnt sich die Richtung der Gefässe im Bau der Wurzel auszupragen.

Es ist wohl anzunehmen, dass die geradlinige Wurzelachse die ursprüngliche war. Sie gestattet zugleich, statisch betrachtet, eine eindeutige Abstützung der Kaukräfte. Man findet daher auch in den Röntgenbildern von Säugetier-Unterkiefern, wie sie z. B. von Katz veröffentlicht wurden, bei Fleischfressern, Nagetieren und Wiederkäuern mit geringen Ausnahmen geradlinige, und bei einzelnen mehrwurzligen Zähnen überdies parallele Wurzeln. Eine Ausnahme bilden lediglich der Reißzahn des Raubtieres und der Nagezahn der Nager. Ersterer hat allerdings eine Funktion, die nicht nur durch die in den Kaumuskeln liegenden Kräfte bestimmt ist, wie auch letzterer durch seine Besonderheiten des Wachstums eine einzigartige Stellung unter allen vorkommenden Zahnformen einnimmt. Aber auch beim menschlichen Zahn zeigt die Gegenüberstellung von oberen und unteren Molaren, abgesehen von ihren einander zugeordneten Achsenrichtungen, eine ganz besondere Eigentümlichkeit, nämlich dass jeder Mahlzahn und seine beiden Antagonisten ein funktionsbezogenes Ganzes bilden.

Es sind aber im menschlichen Gebisse nicht nur die Zahnachsen, sondern auch die Wurzelachsen einander statisch zugeordnet. So entspricht in der Projektion auf die Sagittalebene jeder geradlinigen buccalen Wurzel eines oberen Molaren eine krummlinige seines Antagonisten. Die bucco-mesiale Wurzel des oberen Molaren ist gekrümmt und entspricht statisch der geradlinigen distalen Wurzel ihres Gegenzahnes im Unterkiefer, während die krummlinige des unteren Molaren der geraden bucco-distalen des oberen Molaren statisch zugeordnet ist.

Die Auswirkung der Kaukräfte auf die Zahnwurzelform.

Nachdem wir uns über die Auswirkung der Kaukräfte auf die Achsenrichtung des Zahnes und somit auch über die Achsen-

richtungen der einzelnen Wurzeln auseinandergesetzt haben, müssen wir noch die Auswertung der die Wurzelform bedingenden statischen Grundprinzipien vornehmen.

Die Funktion der Wurzel und die Aufgabe ihres alveolären Aufhängeapparates besteht in der Hauptsache darin, die während des Kauvorganges auftretenden Kräfte aufzunehmen und so zu übertragen, dass der Durchtrennung des Bissens ein möglichst grosser Widerstand entgegengesetzt wird. Die Wurzel wirkt statisch als Vermittler, aber auch als Träger der von aussen auf sie auftretenden Kräfte. Sie wirkt zugleich druckabändernd, indem der die Kaufläche treffende Druck auf die gesamte Oberfläche von Wurzel und Alveole verteilt wird.

In der *Form* dieser Oberflächen muss daher diese besondere mechanische Beanspruchung zum Ausdruck kommen. Es sei mir vorbehalten, nicht auf die Art und Weise der statischen Absicherung der Wurzel in der Alveole eingehen zu müssen — welche durch die Fasern des ligamentum alveolo-dentale erfolgt, wie auch durch das Bindegewebe des Periodontiums und die Kapillarknäuel, die als hydraulische Druckbremse funktionieren.

Stefan Loos hat eine eingehende Studie über diese sehr differenzierten Bewegungsphänomene der Wurzel in der Alveole verfasst. Auch A. M. Schwarz, Synge, Adler, Bauer und Lang haben sich über diese Vorgänge auseinandergesetzt. Letztere haben allerdings das Problem mehr in paradentose-aetiologischer Hinsicht beleuchtet, oder dann, um die biologischen Erscheinungen bei orthodontischen Zahnverschiebungen erklären zu können. Nirgends aber wurde die Form der Wurzel genauer untersucht oder gar statisch erwiesen.

Stefan Loos schreibt einerseits von einer „*Stromlinienform*“ der Wurzel, an anderen Stellen wiederum spricht er von einem „*Kegel*“ oder einem „*konischen Gebilde*“.

Verschiedene Forscher, so vor allem A. M. Schwarz, Bauer und Lang, wie auch Peter Adler, haben sich der Berechnung der im Periodontium wirksamen Kräfte und den bei orthodontischen Bewegungen des Zahnes entstehenden Druckunterschieden zugewandt. Es wurden über die Lokalisation des Druckmaximums teils erbitterte Kontroversen ausgefochten (vergleiche Adler u. Schwarz

in Zeitschrift für Stomat. 1946). Diese recht verschiedenen Angaben kommen hauptsächlich daher, weil man über die statisch am besten erklärliche Form der Zahnwurzel im Unklaren war und deshalb zu Annahmen griff, die den tatsächlichen Verhältnissen nicht entsprechen. Es mögen vielleicht auch mathematische Schwierigkeiten und deren Umgehung im Spiele gewesen sein und damit die Hoffnung, mit allzu vereinfachten schematischen Systemen biologische Rückschlüsse ziehen zu können.

So nimmt Schwarz die Wurzel als einen Vierkantstab an. Adler führt seine Berechnungen an einem Vierkantstab durch, welcher mit seinem kugelförmigen Ende im Alveolengrund durch ein Scharnier verankert ist. Bauer und Lang benutzen für ihre Berechnungen ein System, welches sich uns als eine vierseitige Pyramide vorstellt. Durch Einführung eines Umrechnungsfaktors können die gefundenen Formeln auf einen kreisförmigen Querschnitt, also auf den Kegel, angewandt werden. Alle diese vereinfachten Systeme helfen uns jedoch nicht dabei, die Form der Wurzel physikalisch erklären zu können. Es wird uns eher gelingen, diese Frage mit Hilfe der Festigkeitslehre abzuklären.

Einleitend seien folgende Bezeichnungen erwähnt:

P = Kraft in kg

s = Spannung in kg/mm^2

M_x = Biegemoment, bezogen auf die x-Achse

W_x = Widerstandsmoment, bezogen auf die x-Achse.

Die Begriffe *Biegemoment* und *Widerstandsmoment* möchte ich näher erläutern.

Beim einfachsten Fall des einseitig eingespannten, am freien Ende im Abstand x von der Einspannstelle mit P belasteten Balkens ist das Biegemoment an der Einspannstelle $M_x = P \cdot x$ cm. kg, die Kraftwirkung ist also umso grösser, je grösser entweder P oder x sind. Dem Biegemoment muss nun ein gleich grosses Moment der inneren Kräfte das Gleichgewicht halten, das sich als das Produkt aus der erzeugten Biegespannung s und dem aus der Querschnittform des Balkens abhängigen Widerstandsmoment W ergibt, es muss also sein $M_x = s \cdot W$.

Für einen beliebigen Balken von bekanntem Widerstands-

moment ist daher bei gegebener Belastungsanordnung die im Balken in den Randfasern auftretende Biegespannung allgemein

$$s = \frac{M_x}{W_x} \text{ kg cm}^2$$

Die Widerstandsmomente der verschiedenen in der Bautechnik vorkommenden Querschnitte sind tabellarisch zusammengestellt; so ist W_x für rechteckige Querschnitte $= \frac{b \cdot h^3}{6}$

$$W_x \text{ für runde Querschnitte} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \sim 0,1 d^3$$

Die Zahnwurzel als „Träger gleicher Biegefestigkeit“.

Die beste Ausnützung eines Baustoffes vom statischen Gesichtspunkt aus wird dann vorliegen, wenn alle Querschnitte gleich grosse Biegungsspannungen erfahren. Diese Forderung lässt sich nun nicht absolut in die Wirklichkeit umsetzen, da nur in den Momenten-Nullpunkten des Trägers die Spannung Null vorherrscht, sodass theoretisch ein Querschnitt Null erforderlich wäre. Aber man kann der gestellten Bedingung überall gleich grosser Biegungsspannung durch die Formgebung des Trägers nahe kommen.

- a) *Der Freiträger mit rechteckigem Querschnitt* von gleichbleibender Breite b und veränderlicher Höhe y . Abb. 4a und 4b. Das Moment im Punkte x des Trägers $M = P \cdot x$ liefert bei einer unveränderlichen Breite b und der veränderlichen Höhe y des Querschnittes die Randspannung

$$s = \frac{P \cdot x \cdot 6}{b \cdot y^2}$$

Der Grenzwert dieser Spannung ist die zulässige Biegungsspannung K_b , damit ergibt die Bedingung $s =$ konstant die Gleichung der Begrenzungslinie des Trägers

$$K_b = \frac{P \cdot x \cdot 6}{b \cdot y^2} \text{ oder } y^2 = \frac{6 P}{b \cdot K_b} \cdot x$$

Das ist die Gleichung einer *quadratischen Parabel*, welche zwei Ausführungsformen gestattet. Es sind dies Abb. 4a

und 4b. Die erstere hat als obere Begrenzungslinie eine Gerade, als untere eine Parabel. Bei 4b sind die Begrenzungslinien eine quadratische Parabel.

- b) *Der Freiträger mit kreisförmigem Querschnitt*
Einfluss einer Einzellast am Ende: Abb. 4c.

Als Spannung im Punkte x des Trägers ergibt sich

$$s = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot x \cdot 32}{\pi \cdot y^3}$$

Aus der mit $s = K_b$ die Gleichung der Begrenzungslinie

$$y^3 = \frac{32 \cdot P}{\pi \cdot K_b} \cdot x \text{ folgt.}$$

Diese Kurve ist nun eine Parabel dritten Grades oder eine *kubische Parabel*, deren Endordinate für $x = 1$ den Wert

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot P \cdot 1}{\pi \cdot K_b}}$$

hat. Die Tangenten an die Kurve in der Einspannung des Trägers schneiden auf der Endsenkrechten die Strecke $2/3 d$ ab.

Einfluss einer gleichmässig verteilten Last: Abb. 4d.

Sie ruft im Punkt x des Trägers die Spannung

$$s = \frac{p \cdot x^2 \cdot 16}{\pi \cdot y^3} \text{ hervor.}$$

$$\text{Es folgt } y^3 = \frac{16 \cdot P}{\pi \cdot K_b} \cdot x^2$$

Diese Kurve ist nun eine sogenannte *semikubische Parabel*, deren Tangente auf der Endsenkrechten die Strecke $1/3 d$ abschneiden.

Für die Konstruktion der quadratischen, kubischen und semikubischen Parabel gibt es nun Konstruktionshilfen, auf die ich jedoch nicht näher eingehen möchte. Es ist das für die kubische Parabel in Abb. 6 die Kurve 1'—6'.

In Abb. 5 ist die Konstruktion für die quadratische, die kubische und die semikubische Parabel ausgeführt und dies in einem Verhältnis von $l = 16 \text{ mm}$ und $h = 7 \text{ mm}$, einem Verhältnis, welches für die Wurzel einer ersten oberen Incisiven entsprechen dürfte. Selbstverständlich ist die Konstruktion auch für andere

Längen-Breitenverhältnisse möglich, wie auch deren mathematische und statische Diskussion. Das erwähnte Längen-Breitenverhältnis ist aber bei der Zahnwurzel abhängig von P und K_b des Wurzelmaterials; ich werde im Folgenden näher darauf zurückkommen. Aus dem Vorhergehenden ergibt sich, dass die Zahnwurzel gemäss ihrer statischen Belastung und Funktion einer kubischen Parabel, und da es sich um ein körperliches Gebilde handelt, einem kubischen Rotations-Paraboloid entspricht.

Auf Abb. 6 ist eine Zahnwurzel schematisch abgebildet. Die Wurzelform (eine kubische Parabel) ist einfacher konstruiert als dies auf Abbildung 5 dargestellt wurde. Die Resultate jedoch sind selbstverständlich dieselben.

Im dargestellten Beispiel wirkt in Richtung der Zahnachse eine Kraft $P = 9,5 \text{ kg}$ auf eine Fläche von 38 mm^2 (Durchmesser $= 7 \text{ mm}$), entsprechend 25 kg/cm^2 . Dieser Wert wurde als Mittel für einen oberen Frontzahn mit den Gnathodynamometern, wie auch durch die Konstruktion der im Kiefergebiet wirkenden Komponenten gefunden. Das Verhältnis von Wurzel-durchmesser zu Wurzellänge ist wie in Abb. 5 $7 \text{ mm} : 16 \text{ mm}$. Ferner ist die Wurzel nicht in einem festen Medium eingebettet, sondern physikalisch gesprochen in einer plastischen Masse. Die Reaktion der Kraft wirkt demnach gemäss den Regeln der Hydraulik in der Projektionsebene.

Wir teilen nun die Zahnwurzel in 10 Abschnitte A – K ein und zwar so, dass jede projizierte Ringfläche denselben Flächeninhalt aufweist und $1/10$ der Kraft P , also $0,95 \text{ kg}$ aufnimmt. Diese Kraft lassen wir nun im Sehnenmittel jedes Abschnittes angreifen und konstruieren dazu das Kräftepolygon, z. B. O P Q. Bei genau masstäblichem Vorgehen müssen die Endpunkte aller Resultierenden zu einer Kurve führen; es ist dies die Kurve MN. Die Länge jeder einzelnen Resultierenden entspricht nun genau der Summe aller Kräfte, die senkrecht auf die Oberfläche des betreffenden Wurzelabschnittes einwirken.

Wenn wir für jeden Abschnitt die Resultierende durch die dazugehörige Oberfläche dividieren, dann erhalten wir den *spezifischen Druck*, der für die ganze Wurzeloberfläche *genau gleich* ist. Er ist für die gewählten Grössen 254 gr/mm^2 .

Rus fand 100—200 gr/mm² Druck im Periodontium. Er gibt aber leider nicht an, wie er diese Werte gefunden hat. Sehr abweichende Drucke finden Schwarz und Adler.

Die lineare Auswertung dieser bemerkenswerten Feststellung führt zu Kurve auf Abb. 7, aus der im Kaukraftbereich von 0 bis 10 kg oder im Kaudruckbereich von 0—25 kg/cm² der entsprechende Druck an der Wurzeloberfläche ersichtlich wird.

Die Spannung im Periodontium.

Unter der Annahme, dass die Wurzelform eine kubische Parabel sei, wollen wir nun daran gehen, die Spannung im Periodontium und im Speziellen an den Periodontalfasern zu untersuchen. P sei wiederum 9,5 kg und der Oberflächendruck an der Wurzeloberfläche demnach 0,254 kg/mm². Im Augenblick, in dem der Zahn durch eine äussere — in unserem Falle axial gerichtete — Kraft belastet wird, tritt eine apikal gerichtete Bewegung des Zahnes auf, zugleich aber auch eine Zugsspannung in der Wurzelhaut. Darüber gibt, graphisch dargestellt, die Abbildung 8 genauere Auskunft.

Die Zugsspannung in der rund um die Zahnwurzel befindlichen Wurzelhaut, von im erwähnten Beispiel einer mittleren Dicke von 0,12 mm, errechnet sich genau gleich wie die Zugsspannung in einem Rohrquerschnitt mit 0,12 mm Wandstärke und einem Innendruck von 254 gr/mm² für eine Belastung mit $P = 9,5$ kg.

BEISPIEL 1, Abb. 8.

Ein Streifen von 1 mm Breite und 5 mm Länge, als Projektion eines Halbkreises von 5 mm Durchmesser, sei mit 0,254 kg/mm² belastet. Es ergibt sich daraus eine Kraft von 1,27 kg. Diese Kraft wird durch die beiden Querschnitte des Periodontiums mit $2 \cdot 1,0,12 = 0,24$ mm² aufgenommen. Die daraus errechnete Zugsspannung ergibt $5,3 \text{ kg/mm}^2 = 1,27 : 0,24$.

In derselben Weise kann auch mit den andern Durchmessern der Wurzel vorgegangen werden und es ergibt sich somit die mittlere Kurve in Abbildung 8 für die ganze Länge der Wurzel.

Die Kurve ergibt ferner die Tatsache, dass die Zugspannung am Alveolarrand am grössten ist, gegen den Apex hin aber zu Null wird.

Nicht zuletzt würde die Vektoraddition der in Abbildung 8 gefundenen Zugspannungswerte mit den Druckwerten von Abbild. 6 die Möglichkeit ergeben, die Richtung der Sharpey'schen Fasern des Periodontiums rein graphisch aufzuzeichnen.

BEISPIEL 2, Abb. 8.

Diese Kurvenscharen ergeben dieselben Werte wie Beispiel 1, jedoch für veränderliche axiale Belastungen von 1—10 kg.

In den vorhergehenden Kurven haben wir die Wurzel nun immer in axialer Richtung belastet, weil dieser Fall zugleich als der physiologisch wichtigere erscheint.

Die Kraft P kann jedoch, etwa bei einem oberen Schneidezahn, ausserhalb der Wurzelachse angreifen. Bei Abb. 9 sei daher der Angriffspunkt von P um 2,25 mm nach bukkal versetzt. Aus Gründen der Rechnungsvereinfachung sei der Schwerpunkt der Wurzel auf $\frac{3}{5}$ Wurzellänge angenommen.

In Abb. 9 wird die Wurzel durch den Schwerpunkt in zwei inhaltsgleiche Flächen geteilt; damit können auch die beiden Kräfte X, deren Drehmomente demjenigen der Kraft P entsprechen müssen, einander gleichgestellt werden.

Nach Abbildung 9 ergibt sich für $P = 9,5$ kg eine spezifische *Ueberbelastung* an der Wurzeloberfläche von 89 gr/mm^2 . Bei einer Aenderung von P ändert sich selbstverständlich auch die spezifische Belastung proportional.

Die Gegenüberstellung der Werte von P mit zentralaxialem und exzentrischem Angriffspunkt sprechen für den ersten Belastungsfall. Hier haben wir allseitig eine gleiche Belastung des Periodontiums, wogegen beim zweiten Fall durch Auftreten von Drehmomenten Ueberbelastungen auftreten können, die je nach Grösse und Dauer zu einem Umbau oder einer Schädigung des den Zahn umgebenden Gewebes führen können.

Es ist offensichtlich, dass der Unterkiefer in der Weise geführt und die Zahnachsen möglichst so **eingestellt werden**, um den *zentralen Belastungsfall* aller Zähne während des Kauaktes zu ermöglichen.

Weiterhin ist es nun möglich, aus der Gleichung der kubischen Parabel und somit der statisch begründeten Wurzelform die Formel für die Oberfläche und den Inhalt der Wurzel zu finden.

Die Berechnung dieser Gleichungen ergab eine gewisse Uebereinstimmung mit jenen Werten, welche Cieszynski mit maßstäblichem Verfahren für die Wurzeloberflächen gefunden hat.

Ferner liegt es ebenfalls im Bereiche der Möglichkeiten, jene Berechnungen, welche Peter Adler (Z. f. Stomat. 1946) für die körperliche Bewegung und Kippung eines Zahnes durchgeführt hat, mit Hilfe des kubischen Rotations-Paraboloids durchzuführen.

Es sei mir gestattet, den Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu überschreiten und auf die die Seiten füllenden, nur unter Zuhilfenahme der höheren Mathematik durchführbaren Entwicklungen nicht einzugehen.

Zusammenfassung.

Nach einem Ueberblick über die Mechanik des Kauaktes und die dabei entstehenden Druckgrößen wurde versucht, die Richtung der Zahnwurzeln im Ober- und im Unterkiefer rein konstruktiv aus den beim Kauvorgang entstehenden Kraftkomponenten aufzuzeigen. Die sich daraus ergebenden Winkel Zahnachse-Horizontalebene zeigen eine Uebereinstimmung mit jenen Winkeln, welche in Fernröntgenbildern und orthognathostatischen Modellen gefunden werden.

Die Einstellung der Zahnachsen ist demnach das Resultat funktioneller Kräfte, vor allem jener, welche sich aus der Tätigkeit der Kaumuskulatur ergeben.

Die Form der Zahnwurzel ist weder ein „Kegel“ noch sonst ein „konisches Gebilde“, sondern ein kubisches Rotations-Paraboloid. Diese Annahme ergibt nun die Möglichkeit, die

Wurzel in Relation mit den sie umgebenden Gewebe unter verschiedenen Gesichtspunkten statisch zu untersuchen, und zwar unter Berücksichtigung der Kräfte, welche beim Kauakt auf die Wurzel einwirken, aber auch jener Kräfte, welche zum Zwecke orthodontischer Bewegung auf den Zahn gerichtet werden.

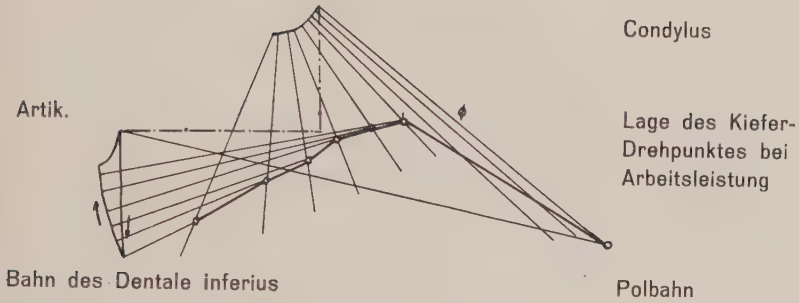
Ich habe, mit dem Ziele, umständliche Integralrechnungen aus drucktechnischen Gründen zu umgehen, jene Berechnungen herausgegriffen, welche vornehmlich mit der graphischen Statik durchgeführt werden können. Es sind dies der spezifische Druck an der Oberfläche, die Zugspannung im Periodontium und der spezifische Ueberdruck im exzentrischen Belastungsfalle.

Literaturnachweis.

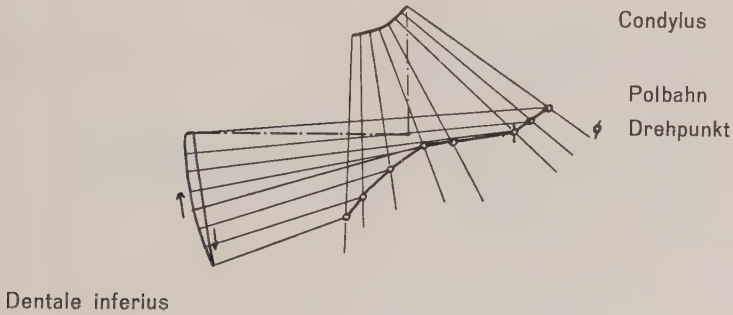
- Adler P. Z. f. Stomat. 1946 No. 2, 3, 4
Kritik der gebr. Klassifizierung orthod. Kräfte.
Die physikalischen Voraussetzungen der biolog.
Zahnverschiebung.
- Bay Roland, Wild Heinrich Schw. Mon. f. Zhlkde, 55, 11
Die Gysi'schen Hebelgesetze am Unterkiefer.
- Bauer und Lang Vjschr. Zhk. 1928 S. 321
Ueber das Wandern der Zähne.
- Cieszynski Anton Fortschr. der Orthod. 1933 S. 31
Orthodontie und stat. Aufbau des Schädels.
- Culmann Carl Meyer & Zeller, Zürich 1875
Die graphische Statik.
- Gottlieb Bernhard Zeit. f. Stomat. 1931 S. 370
Die Gewebsveränderungen bei Ueberbelastung.
- Hiltebrand Carl D. Z. Wochenschrift 1938 S. 356
Warum haben die Oberkiefer-Backenzähne 3 Wurzeln.
- Haber Gustav Berlin 1926
Die Aufgaben der Kaudruckmessung.
- Hütte Berlin 1920
Des Ingenieurs Taschenbuch.
- Handbuch der Physik Band VI Berlin 1928
Mechanik der elastischen Körper.
- Jugel und Fricke Vjschr. f. Zhlkde 43 S. 78
Die Statik in der Zahnheilkunde.
- Katz Asari Vjschr. f. Zhlkde 1931 S. 85 und 214
Architektur des Unterkiefers im Zusammenhang mit
der Lage der Wurzeln.
- Köhler L. D. Mschr. Zhkde 39 S. 705
Versuch, die Gesetze der Statik und Mechanik in
die Physiologie und Form des menschl. Gebisses
einzuführen,

- Köhler L. Z. f. Stomat. 1922 S. 210
 Spez. Messungen des Kaudruckes mit Hilfe der
 Brinell'schen Kugelprobe.
- Klein Z. f. Stomat. 1928 S. 417
 System. Untersuchungen über Periodontalbreiten.
- Loos Stefan Z. f. Stomat. 1948 H. 10
 Ueber die Bewegungen der Zähne innerhalb der
 Kiefer und Alveolen.
- Loos Stefan Z. f. Stomat. 1937 Heft 18
 Zur Frage der funktionellen mechanischen Beanspruchung des Kauorgans.
- Müller Max Leipzig 1925
 Grundlagen und Aufbau des Artikulationsproblems.
- Schröder B. D. Z. M. und K.-hklde. 1936 S. 336
 Richtungsbeziehungen zwischen den Wurzeln der
 oberen und unteren Mahlzähne.
- Schwarz A. M. Z. f. Stomat. 1928 S. 40
 Ueber die Bewegung belasteter Zähne.
 Z. f. Stomat. 1928 S. 398; 1929 S. 497
 Mathem. Ueberprüfung des Verhaltens belast. Zähne.
- Triepel Herm. Wiesbaden 1918
 Einführung in die physik. Anatomie.

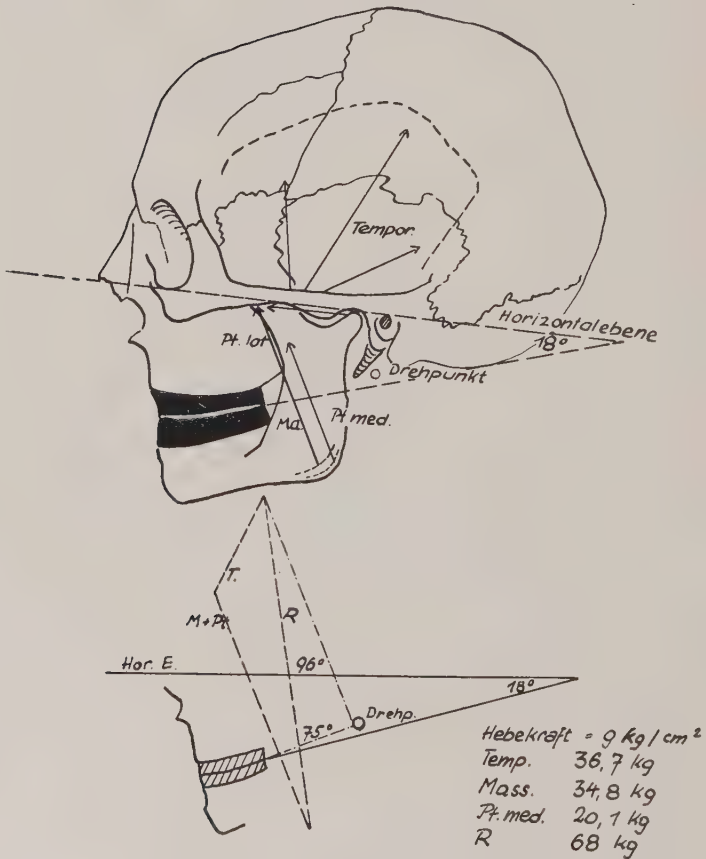
Scherenbisskauen



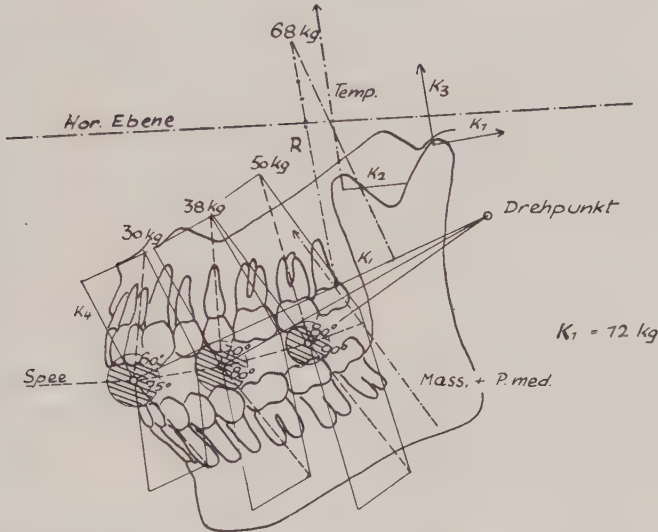
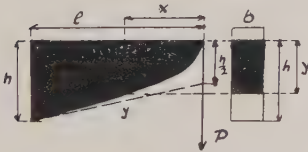
Zangenbisskauen



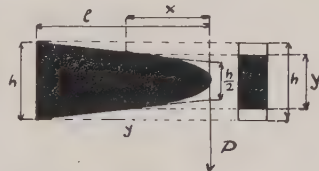
Die Resultanten und Komponenten der Kaumuskulatur



Verhältnis der Zahnachsen zu Kaukraftkomponenten

Freitragr gleicher Biegefestigkeit und gleicher Breite
Quadratische Parabel

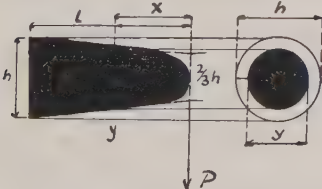
obere Begrenzung = Gerade



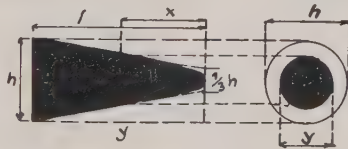
Begrenzungslinien = Parabeln

$$y^2 = \frac{6 P}{b \cdot K_b} \cdot x$$

Freitragr gleicher Biegefestigkeit u. kreisförm. Querschnitts

Einzellast am Ende **Kub. Parabel**

$$y^3 = \frac{32 P}{\pi \cdot K_b} \cdot x$$

Gleichmäß. verteilte L. **Semikub. Par.**

$$y^3 = \frac{16 P}{\pi \cdot K_b} \cdot x^2$$

Abb. 5

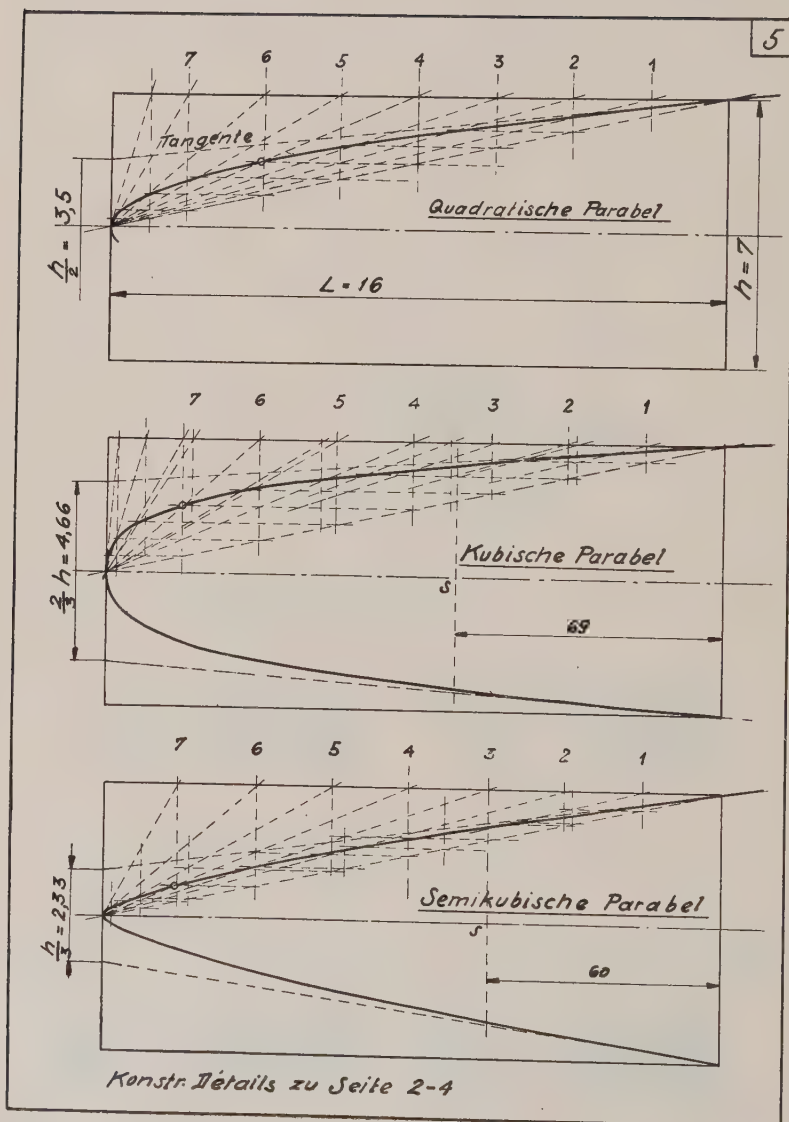
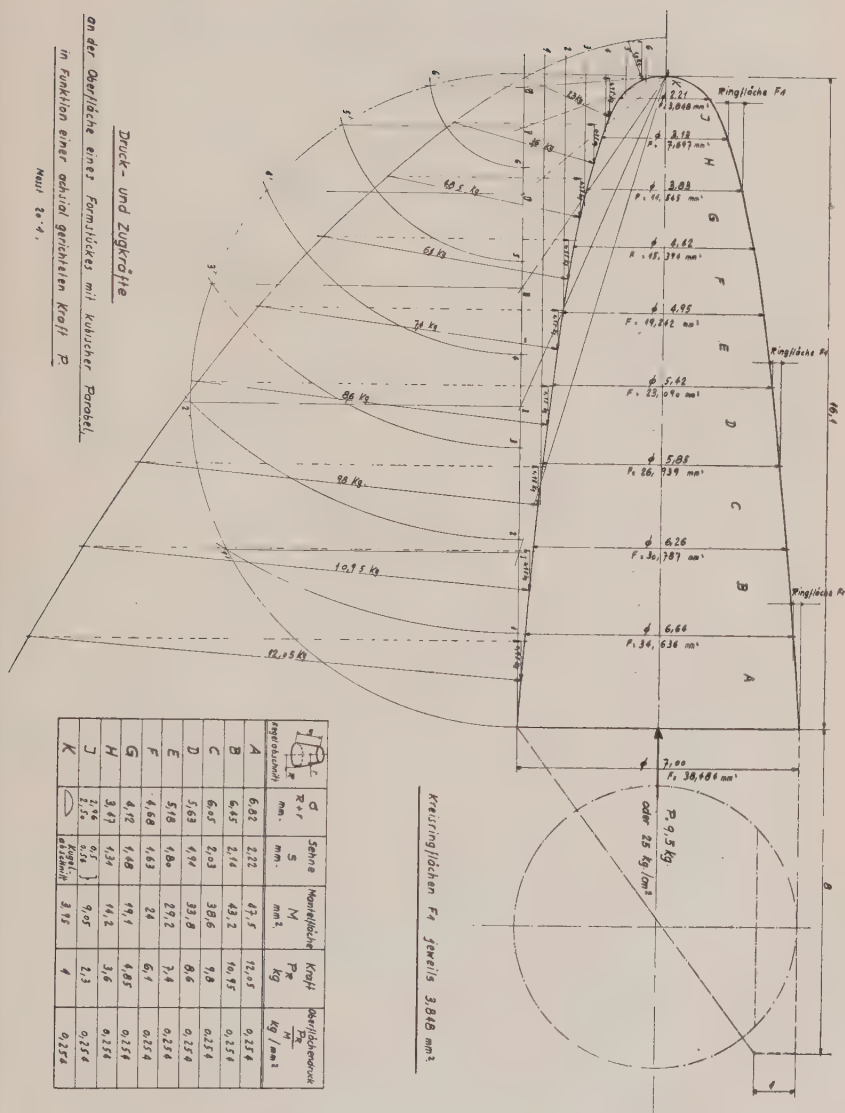
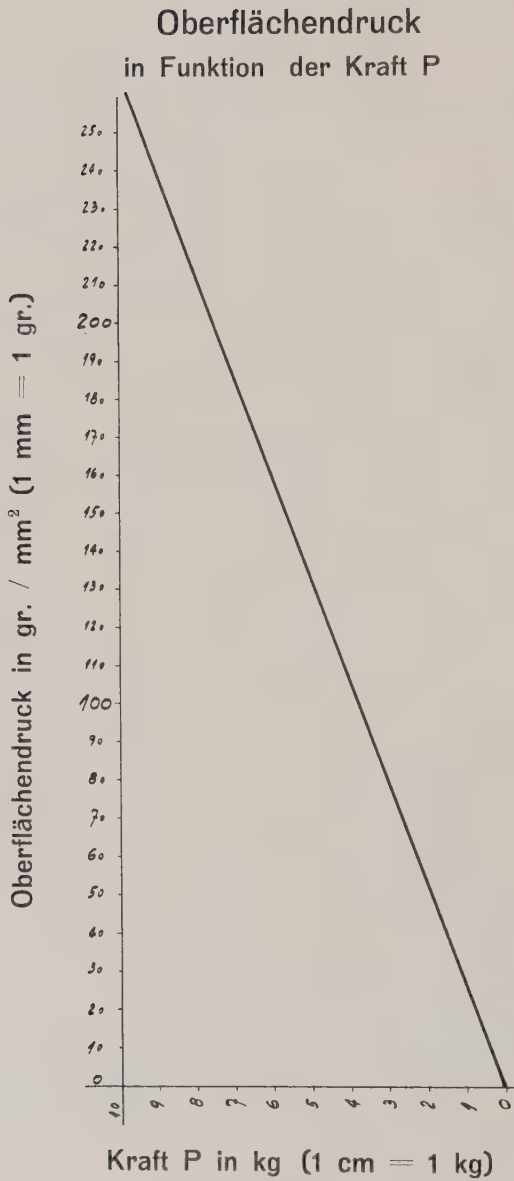
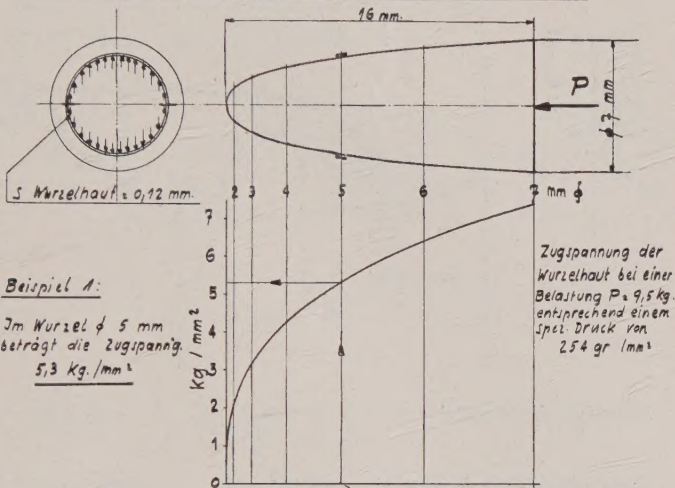


Abb. 6





Zugspannungen in der Wurzelhaut für die
verschiedenen Wurzeldurchmesser und variabler Belastung



Beispiel 1:

Im Wurzel ϕ 5 mm
 beträgt die Zugspannig.
5,3 kg/mm²

Beispiel 2:

Bei einer Belastung
 von P = 5 kg. be-
 trägt die Zugspannig.
 im Wurzel ϕ 5 mm
= 2,8 kg/mm²

